

## Анализ сигналов от движущегося объекта автодинных локаторов с линейными видами модуляции частоты

*В. Я. Носков\*, К. А. Игнатков, А. П. Чупахин*

Уральский федеральный университет имени первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

\* noskov@oko-ek.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследования особенностей формирования сигналов автодинной системы ближней радиолокации с линейной частотной модуляцией для движущегося отражающего объекта. Получены основные соотношения и результаты вычисления автодинных сигналов для случаев, когда продолжительность их периода значительно больше времени запаздывания отраженного излучения, а также для случаев, когда данное неравенство не выполняется. Рассмотрены особенности сигналов для приближающегося и удаляющегося объекта. Экспериментальные данные получены на генераторе, выполненном на диоде Ганна 8-мм диапазона с перестройкой частоты при помощи варикапа.

**Ключевые слова.** Автодин, автодинный сигнал, системы ближней радиолокации, частотная модуляция, генератор на диоде Ганна.

## Moving Object Signal Analysis of Autodyne Radars with Linear Types of Frequency

*Vladislav Ya. Noskov, Kirill A. Ignatkov, Andrey P. Chupahin*

Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

\* noskov@oko-ek.ru

**Abstract.** General equations for analysis of the signal formation peculiarities are obtained for the autodyne short-range radar (ASRR) systems both for the case of the fixed and moving reflecting object, using arbitrary types of frequency modulation (FM). The developed mathematical model anticipates the interaction analysis of ASRR with the reflected emission at arbitrary ratio of the delay time  $\tau$  of the reflected emission and the autodyne signal period  $T_a$ . Signal features for the oncoming and outcoming object are considered. The experimental data are obtained on the oscillator made on the 8mm-Gunn diode with the varicap frequency tuning.

The fulfilled calculations and experimental investigations of ASRR signals for linear types of FM show that the autodyne frequency both for the moving and fixed reflector exactly corresponds to the frequency of transformed signal obtained in the case of the

homodyne system. However, the presence of autodyne signal distortions requires the account in the signal processing devices under conditions, when the distance to the reflecting object is small, and the feedback parameter  $C_{fb}$  is commensurable to 1.

The obtained results of autodyne characteristic research in the case when the autodyne signal period is commensurable or even less than delay time show that the distortion of autodyne signal at hypothetical keeping of the reflected amplitude decreases with distance growth. The calculations show that if the feedback parameter exceeds some boundary value even in several times, in higher operation zones of ASRR with FM operation can be provided with formation of quasi-harmonic signals.

The obtained analysis results are developed and supplemented of results of known investigations, which were published in previous papers. Revealed regulations of signal formation in ASRR with FM have enough general characteristics and physical interpretation on the base of the step method known in systems with delay. In this connection, the obtained results in this paper can be used in the calculations of autodyne system signals made on semiconductor laser modules with FM.

**Keywords.** Autodyne, autodyne signals, short-range radar, frequency modulation, Gunn-diode oscillator.

---

© Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., 2017

## Введение

Автодинные системы ближней радиолокации (АСБРЛ) имеют простейшую конструкцию и низкую стоимость благодаря использованию в качестве приемопередающего устройства единственного каскада — автогенератора (автодина) [1]. Он одновременно совмещает в себе функции передатчика зондирующего излучения и приемника отраженного сигнала. Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте, который состоит в изменениях параметров колебаний (амплитуды, частоты, мощности и фазы), а также практически всех токов и напряжений в цепях смещения генератора под воздействием отраженного излучения от объектов локации. Выделение этих изменений в качестве сигналов и их обработка обеспечивают получение необходимой информации об объектах локации и их кинематических характеристиках.

Благодаря отмеченным достоинствам АСБРЛ широко используются в тех практических приложениях, в которых указанные качества являются определяющими. К ним относятся системы военного назначения, обнаружители несанкционированного проникновения в охраняемые помещения, датчики и измерители параметров движения на транспорте [2–7]. Кроме того, автодинные приемопередатчики используются в аппаратуре диагностики и контроля технологических процессов в промышленности, приборах для научных и медико-биологических исследований различных объектов дистанционного зондирования [8–14]. Для решения указанных задач, а также для систем

радиосвязи промышленностью выпускаются различные автодинные модули и микросхемы в монолитном и гибридно-интегральном исполнении [15–17].

Применение частотной модуляции (ЧМ) излучения значительно расширяет функциональные возможности АСБРЛ и улучшает их тактико-технические характеристики [1]. Как и в гомодинных системах, в АСБРЛ широко используются линейные, синусоидальные и прямоугольные законы ЧМ-излучения [3, 5–7]. Для линейных законов ЧМ характерно наличие относительно протяженных во времени участков модуляционной характеристики, на которых скорость изменения частоты колебаний генератора постоянна. К таким законам относятся пилообразные законы трех видов: неравнобедренный, несимметричный и симметричный. Первый из них используется редко, а два последних находят самое широкое использование, что объясняется рядом положительных свойств выходных сигналов: постоянство мгновенной частоты автодинного сигнала в течение почти всего периода модуляции (или его части), а также его достаточно компактный спектр.

Анализу особенностей формирования сигналов АСБРЛ с ЧМ посвящено большое число литературных источников (см., например, [1, 18–22]). В них для описания поведения автодина используются различные математические модели генератора и методы представления функций воздействия собственного отраженного излучения. В ряде работ специфика формирования сигналов АСБРЛ с ЧМ рассмотрена с позиций фазового запаздывания отраженного излучения [20–22]. Данный подход, по нашему мнению, отражает суть явлений в связанной системе «генератор — отражающий объект» наиболее адекватно. В этих работах показана, например, природа наблюдаемых экспериментально явлений ангармонических искажений автодинных сигналов и периодической нестационарности уровня шума [22, 23]. Данные особенности также активно обсуждаются в публикациях, посвященных изучению полупроводниковых лазерных автодинов с ЧМ [24–29]. При этом в большинстве известных работ решение полученных уравнений для разработанных моделей справедливо при выполнении условия, при котором время запаздывания  $\tau$  отраженного излучения значительно меньше периода  $T_a$  автодинного сигнала:  $\tau \ll T_a$ .

В реальных условиях функционирования АСБРЛ с ЧМ миллиметрового диапазона при увеличении расстояния до объекта локации данное неравенство может нарушаться. Анализ особенностей формирования сигналов в этих условиях посвящены работы последнего времени [30, 31]. В них показано, что с увеличением расстояния до объекта локации наблюдается уменьшение степени ангармонических искажений сигналов. Однако в этих работах

не учтено влияние перемещения объекта локации на формирование сигналов, что не в полной мере отражает реальность условий работы АСБРЛ с ЧМ.

Целью настоящей работы является, на примере использования наиболее известных линейных законов ЧМ, получение общих выражений и выполнение на их основе комплекса исследований особенностей формирования сигналов в зависимости от параметров модуляции и условий работы АСБРЛ, учитывающих не только дальность до отражающего объекта, но и ее изменения. При этом рассмотрены случаи как приближающегося, так и удаляющегося объекта.

### Исходные соотношения для анализа сигналов

Эквивалентная схема автодина с ЧМ показана на рис. 1. Основные компоненты этой схемы приведены к сечению двухполюсного активного элемента (АЭ). Средняя за период колебаний проводимость АЭ  $Y_{\text{АЭ}}$  в общем случае является комплексной и зависящей от текущих значений амплитуды  $A$  и частоты  $\omega$  колебаний:  $Y_{\text{АЭ}} = G_{\text{АЭ}} + jB_{\text{АЭ}}$ , где  $G_{\text{АЭ}} \equiv G_{\text{АЭ}}(A, \omega)$ ,  $B_{\text{АЭ}} \equiv B_{\text{АЭ}}(A, \omega)$  — резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно. СВЧ-резонатор генератора представлен эквивалентным колебательным контуром, который содержит индуктивность  $L_{\text{рез}}$ , проводимость собственных потерь  $G_{\text{рез}}$  и емкость  $C_{\text{рез}}$ . При этом емкость представляет собой совокупность емкостей собственно резонатора и варикапа  $C_{\text{вар}}$ , предназначенного для электронной перестройки частоты генерации.

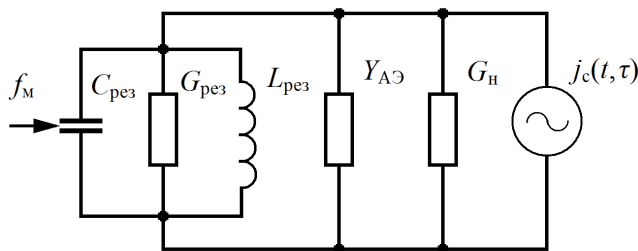


Рис. 1. Эквивалентная схема автодина с ЧМ

Параллельно колебательному контуру подключен также зависимый источник тока  $j_c \equiv j_c(t, \tau)$ , отображающий воздействие на генератор собственного отраженного излучения, запаздывающего относительно текущего времени  $t$  на время  $\tau = 2l/c$ , где  $l$  — расстояние до отражающего объекта;  $c$  — скорость распространения излучения. Проводимость  $G_{\text{н}}$  — эквивалентная нагрузка генератора, которой является входная проводимость антенны.

С помощью законов Кирхгофа для эквивалентной схемы (рис. 1) составлены дифференциальные уравнения для мгновенных значений токов и напряжений. Затем, используя методы медленно меняющихся амплитуд и усреднения в изложении Курокавы [32], мы получили укороченные дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы колебаний. Далее были найдены уравнения для стационарных значений амплитуды  $A_0$  и частоты  $\omega_0$  колебаний автономного генератора.

После этого в предположении малого уровня отраженного излучения по отработанной методике получена система линеаризованных дифференциальных уравнений для малых относительных изменений амплитуды  $a = (A - A_0) / A_0$  и частоты  $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$  колебаний [33, 34]:

$$(Q_n / \omega_0)(da / dt) + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau), \quad (1)$$

$$\beta a + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau), \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  и  $\beta$  — параметры определяющие крутизну инкремента, неизодромность и неизохронность генератора соответственно;  $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 [A(t, \tau) / A(t)]$ ,  $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$  — модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения, приведенного к выходу генератора;  $\Gamma_0$  — коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до объекта и обратно;  $A(t, \tau)$ ,  $A(t)$  и  $\Psi(t, \tau)$ ,  $\Psi(t)$  — амплитуды и фазы колебаний генератора из предыстории системы ( $t - \tau$ ) и в текущий момент времени  $t$ ;  $\eta = Q_n / Q_{вн}$ ,  $Q_{вн}$ ,  $Q_n$  — коэффициент полезного действия, нагруженная и внешняя добротности колебательной системы.

При ЧМ генератора изменением напряжения смещения на варикапе происходит как частотная, так и «паразитная» амплитудная модуляция (ПАМ) излучения:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_{\text{ЧМ}}(t) = \omega_0 [1 + m_{\text{ЧМ}} f_m(t)], \quad (3)$$

$$A(t) = A_0 [1 + a_{\text{АМ}}(t)] = A_0 [1 + m_{\text{АМ}} f_m(t)], \quad (4)$$

где  $m_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \omega_0$  и  $m_{\text{АМ}} = \Delta A_{\text{АМ}} / A_0$  — коэффициенты частотной (ЧМ) и амплитудной (АМ) модуляции излучения соответственно;  $\Delta\omega_{\text{ЧМ}}$ ,  $\Delta A_{\text{АМ}}$  — максимальные отклонения амплитуды и частоты генерации от их стационарных значений  $A_0$  и  $\omega_0$  вследствие модуляции колебаний генератора;  $f_m(t)$  — нормированная модулирующая функция. Квазистатическое решение первого приближения [35] системы уравнений (1), (2) с учетом (3), (4) для относительных изменений амплитуды  $a(t, \tau)$  и абсолютных изменений частоты  $\omega(t, \tau)$  генерации автодина имеет вид:

$$a(t, \tau) = m_{\text{AM}} f_m(t) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (5)$$

$$\omega(t, \tau) = \omega_0 \{1 + m_{\text{ЧМ}} f_m(t) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta]\}, \quad (6)$$

где  $K_a$ ,  $L_a$  — коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации;  $\psi = \arctg(\rho)$ ,  $\theta = \arctg(\gamma)$  — углы фазового смещения;  $\rho = \varepsilon / Q_n$ ,  $\gamma = \beta / \alpha$  — коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно.

Для получения выражений, описывающих автодинный отклик в общем случае произвольного соотношения времени запаздывания  $\tau$  отраженного излучения и периода  $T_a$ , используем известный подход к анализу систем с запаздыванием, который развит на случай описания сигналов обычных автодинов (без ЧМ) в работах [36, 37]. Суть его состоит в разложении функций  $A(t, \tau)$  и  $\Psi(t, \tau)$  запаздывающего воздействия в ряды Тейлора по малому параметру — времени запаздывания  $\tau$  по отношению к текущему времени  $t$ . При этом полагается отсутствие разрывов функций (5), (6) на всем интервале времени формирования автодинного отклика. Кроме того, здесь исключаем из рассмотрения переходные процессы в генераторе в зонах обращения модулирующей функции. Тогда с учетом сказанного выражения для  $\Gamma(t, \tau)$  и  $\delta(t, \tau)$  в (5), (6), как функции нормированного (безразмерного) времени запаздывания  $\tau_n = \omega_0 \tau / 2\pi$ , имеют вид:

$$\Gamma(t_n, \tau_n) = \Gamma_0 \{1 + 2\pi r_n \Gamma_0 K_a \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n) - \psi + \Theta_n(r_n)]\}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta(t_n, \tau_n) = & 2\pi \tau_n + \pi B_{\text{ЧМ}} f_m(t_n) - \\ & - C_{\text{ос}} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta + \Theta_n(r_n)], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $r_n = l / \Lambda_a = \tau / T_a$  — параметр нормированного расстояния;  $\Lambda_a = c T_a / 2$  — длина волны автодинного сигнала;  $B_{\text{ЧМ}} = \Delta F_{\text{ЧМ}} \tau$  — параметр «базы ЧМ», который определяет число периодов сигнала, укладывающихся на периоде модулирующей функции при неподвижном отражающем объекте;  $\Delta F_{\text{ЧМ}} = \Delta \omega_{\text{ЧМ}} / 2\pi$ ;  $C_{\text{ос}}$  — параметр обратной связи автодинной системы;  $t_n = \Omega_m t / 2\pi$  — нормированное время модулирующей функции;  $\Omega_m$  — частота модуляции;  $X_n(r_n)$ ,  $\Theta_n(r_n)$  — амплитудные значения и фазовые сдвиги  $n$ -х членов ( $n = 0, 1, \dots, N$ ) рядов в выражениях (7) и (8):

$$X_n(r_n) = \frac{(2\pi r_n)^{2n} \sqrt{4(n+1)^2 + (2\pi r_n)^2}}{2(n+1) \cdot (2n+1)!}, \quad \Theta_n(r_n) = -\arctg \frac{\pi r_n}{(n+1)}. \quad (9)$$

Далее рассмотрим особенности функционирования АСБРЛ с ЧМ без учета в (5), (6) ПАМ. Кроме того, автодинными изменениями амплитуды колебаний  $\Gamma K_a$  можно пренебречь, поскольку  $\Gamma K_a \ll 1$ . Поэтому в выражении (7) второе слагаемое в больших скобках можно не учитывать. Такое приближение в математической модели автодинной системы полагает учет лишь фазового запаздывания отраженного излучения. При этом отметим, что известные решения [22] для автодинного отклика, которые следуют из (5), (6) и (8), получены в первом приближении, полагая  $n = 0$ . Учет членов рядов более высокого порядка в этих выражениях позволяет, как показано ниже, учитывать также динамику изменения фазы  $\delta(t_n, \tau_n)$  отраженного излучения.

В этой связи выражения для нормированных относительно максимальных значений изменений амплитуды и частоты колебаний в виде амплитудной (АХА)  $a_n(t_n, \tau_n)$  и частотной (ЧХА)  $\chi_n(t_n, \tau_n)$  характеристик автодина имеют вид:

$$a_n(t_n, \tau_n) = a(t_n, \tau_n) / \Gamma_0 K_a = \cos[\delta(t_n, \tau_n) - \psi], \quad (10)$$

$$\chi_n(t_n, \tau_n) = \chi(t_n, \tau_n) / \Gamma_0 L_a = -\sin[\delta(t_n, \tau_n) + \theta]. \quad (11)$$

Решение трансцендентного уравнения (8) при условии его гладкости, когда  $C_{oc} < 1$ , находим методом последовательных приближений. Данное решение в виде фазовой характеристики автодина (ФХА)  $\delta(t_n, \tau_n)$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t_n, \tau_n) = & \delta(t_n, \tau_n)_{(0)} - C_{oc} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(1)} + \theta + \Theta_n(r_n) - \\ & - C_{oc} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(2)} + \theta + \Theta_n(r_n) - \dots \\ & - C_{oc} \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n) \sin[\delta(t_n, \tau_n)_{(k)} + \theta + \Theta_n(r_n)] \dots], \end{aligned} \quad (12)$$

где индексами в круглых скобках около слагаемых  $\delta(t_n, \tau_n)$  обозначен порядок приближения;  $\delta(t_n, \tau_n)_{(0,1,\dots,k)} = 2\pi\tau_n + \pi B_{\text{ЧМ}} f_m(t_n)$ .

Нулевому приближению, когда в (12) учитывается только первый член  $\delta(t_n, \tau_n)_0$  суммы, соответствует линейная фазовая характеристика, которая характерна для гомодинных СБРЛ. Последующие приближения вносят нелинейность в эту зависимость, что является атрибутом автодинных систем, обусловленным автодинными изменениями частоты. Поэтому ниже основное внимание в выполняемых исследованиях будет сосредоточено на выявлении особенностей сигналов АСБРЛ с ЧМ в условиях, когда параметр  $C_{oc}$  соизмерим с единицей.



Далее, для учета движения отражающего объекта в автодинных характеристиках (10)–(12) в первый член правой части выражений (8) и (12)  $\delta(t_n, \tau_n)_{(0)}$  сделаем подстановку:  $\tau_n = \tau_{0n} + \tau_n(t_n)$ . В результате получим:

$$\delta(t_n)_{(0)} = 2\pi\tau_{0n} + 2\pi B_d \cdot \tau_n(t_n) + \pi B_{\text{ЧМ}} \cdot f_m(t_n) + 2\pi B_d \chi_{\text{ЧМ}} \cdot \tau_n(t_n) \cdot f_m(t_n), \quad (13)$$

где  $\tau_{0n} = \omega_0 \tau_0 / 2\pi$  — начальное значение нормированного расстояния;  $B_d = (\Omega_d / \Omega_m)$  — параметр «базы доплеровского сигнала», показывающий, какое число периодов доплеровского сигнала укладывается на период модуляции;  $\Omega_d$  — частота Доплера;  $\chi_{\text{ЧМ}} = (\Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \omega_0)$  — относительная величина девиации частоты при модуляции;  $\tau_n(t_n)$  — переменная составляющая нормированной дальности, обусловленная перемещением отражающего объекта.

Теперь функции (10) — (12) с учетом (13) зависят от одной переменной  $t_n$ :  $\delta(t_n, \tau_n) \equiv \delta(t_n)$ ,  $a_n(t_n, \tau_n) \equiv a_n(t_n)$  и  $\chi_n(t_n, \tau_n) \equiv \chi_n(t_n)$ . При этом последним членом в (13), ввиду выполнения сильного неравенства:  $2\pi B_d \chi_{\text{ЧМ}} \ll 1$ , можно пренебречь.

### Численный анализ сигналов при ЧМ по пилообразному несимметричному закону

Сигналы АСБРЛ с ЧМ обычно регистрируются в цепи питания СВЧ генератора (сигнал автодетектирования) или путем детектирования изменений амплитуды его колебаний. В формирование этих сигналов вносят свой вклад изменения как амплитуды колебаний в виде АХА  $a_n(t_n)$ , так и текущей частоты генерации автодина в виде ЧХА  $\chi_n(t_n)$ . Чтобы выяснить особенности формирования автодинных сигналов от движущегося объекта, выполним расчеты и анализ сигналов АСБРЛ для пилообразного закона с несимметричной формой. Математическая запись для этого закона имеет вид [22]:

$$f_m(t_n) = (2/\pi) \arctg\{(2\pi t_n + \pi)/2\}. \quad (14)$$

На рис. 2 и 3 для случаев соответственно приближающегося и удаляющегося объекта локации представлены временные диаграммы формирования ФХА  $\delta(t_n)$ , мгновенной разности частот (МРЧ)  $IFD(t_n) = d\delta(t_n)/dt_n$  (Instantaneous Frequency Difference), характеризующей скорость изменения набега фазы отраженного излучения, и АХА  $a_n(t_n)$ . Расчеты выполнялись согласно (10), (12) с учетом (13) и (14) при  $B_d = \pm 1$  для различных нормированных расстояний  $r_n$  до отражающего объекта:  $r_n = 0$  (а);  $r_n = 0,5$  (б);  $r_n = 1$  (в);  $r_n = 1,5$  (г).



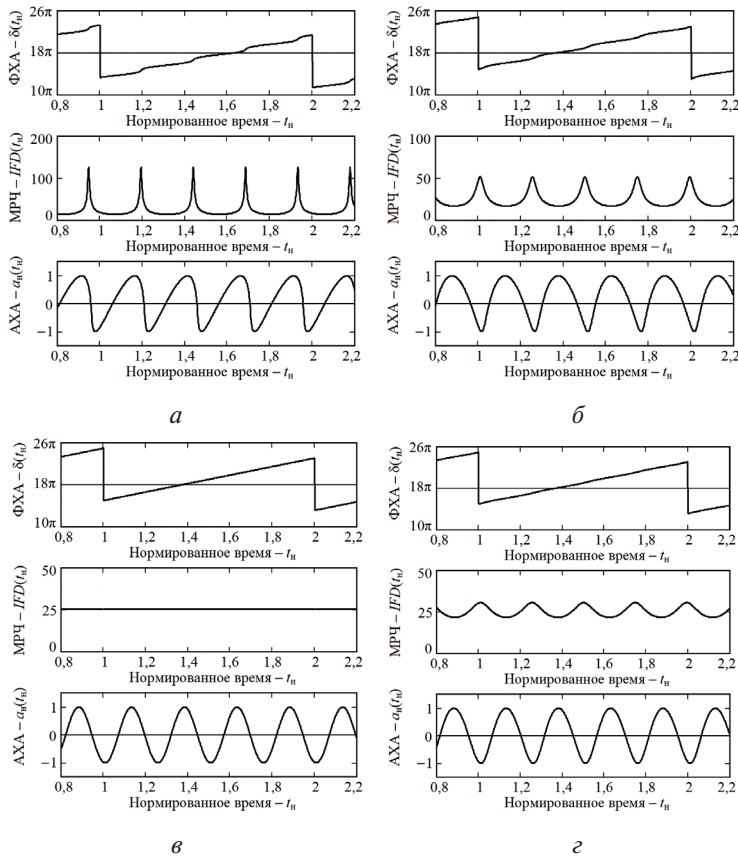


Рис. 2. Временные диаграммы ФХА  $\delta(t_n)$ , МРЧ  $IFD(t_n)$  и АХА  $a_d(t_n)$  для приближающегося объекта при  $r_n = 0$  (а),  $r_n = 0,5$  (б),  $r_n = 1$  (в) и  $r_n = 1,5$  (г)

В случае приближающегося объекта знак при параметре  $B_d$  в (13) берем отрицательным, а в случае удаляющегося — положительным. Для случая приближающегося объекта и различных значений  $r_n$  были рассчитаны также спектрограммы сигналов  $a_n(F_n)$ , представленные на рис. 4. Для случая удаляющегося объекта вид спектрограмм отличается только смещением по частоте на две единицы вверх. Переменная составляющая нормированной дальности  $\tau_n(t_n)$ , обусловленная перемещением отражающего объекта, в расчетах согласно (13) вводилась функцией:

$$\tau_n(t_n) = (1000 / 2\pi) \sin(2\pi t_n / 1000). \quad (15)$$

Диаграммы, представленные на рис. 2 и 3, здесь и в дальнейших расчетах получены при  $\theta = 1$ ;  $\psi = 0,2$ ;  $B_{чм} = 5$ ;  $B_d = 0$ ;  $C_{ос} = 0,8$ ;  $k = N = 50$ . Отрезки нормированного расстояния  $r_n$ , кратные целым числам, далее будем называть соответствующими «рабочими зонами», начиная с первой, где  $0 \leq r_n \leq 1$ . Отметим также, что принятые в рас-

четах числа  $N$  членов рядов в (7), (8) и порядка  $k$  приближения в (12) обеспечивают сходимость результатов расчетов в диапазонах значений  $r_n \leq 5$  и  $C_{oc} \leq 0,98$ .

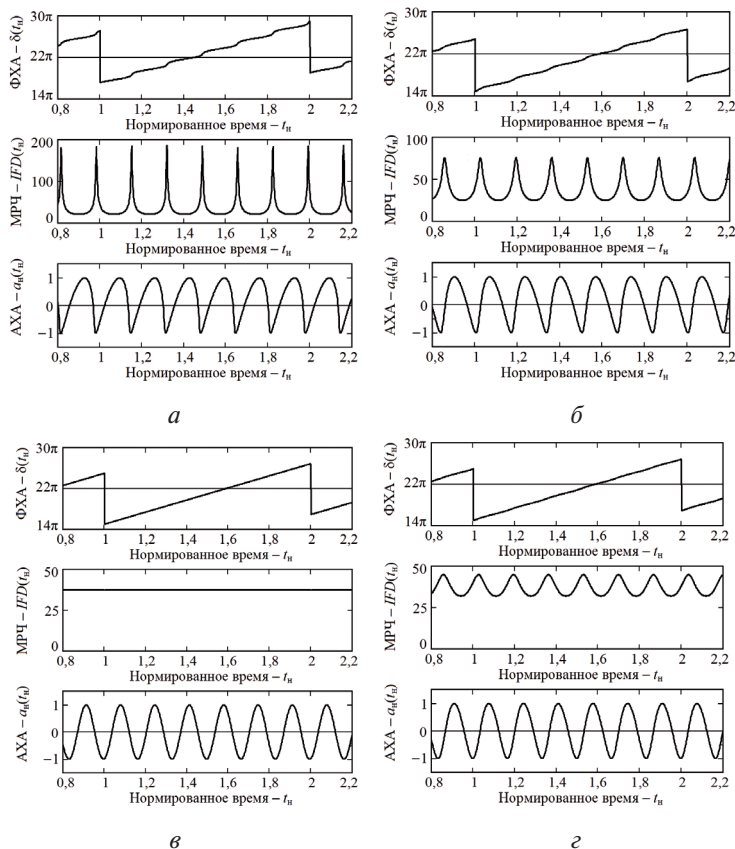


Рис. 3. Временные диаграммы ФХА  $\delta(t_n)$ , МРЧ  $IFD(t_n)$  и АХА  $a_n(t_n)$  для удаляющегося объекта при  $r_n = 0$  (а),  $r_n = 0,5$  (б),  $r_n = 1$  (в) и  $r_n = 1,5$  (з)

Из сравнения временных и спектральных диаграмм (см. рис. 2, 3 и 4) следует, что смена знака радиальной скорости вызывает лишь изменения частоты сигнала на величину доплеровского смещения. Для объекта, который приближается, частота сигнала в данном случае уменьшается, а для удаляющегося объекта — увеличивается.

Из анализа приведенных на рис. 2, а, рис. 3, а и на рис. 4, а временных и спектральных диаграмм видно, что полученные здесь результаты для случая  $r_n = 0$  соответствуют результатам исследований сигналов АСБРЛ с ЧМ, которые были получены в работах [20, 22]. В этих работах рассмотрены особенности формирования автодинного отклика лишь в первом приближении, когда выполняется неравенство

$\tau \ll T_a$ . При этом показано, что неравномерность набега фазы  $\delta(t_n)$  отраженной волны обусловлена изменениями частоты  $\chi_n(t_n)$ .

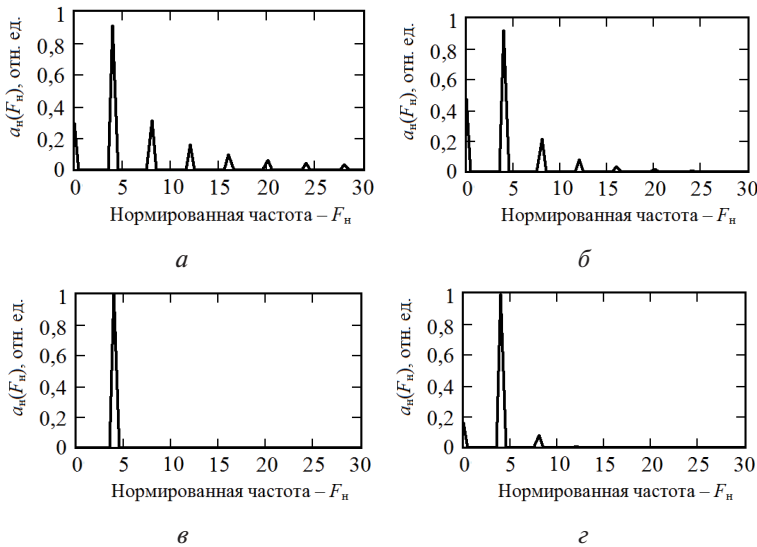


Рис. 4. Спектрограммы  $a_n(F_n)$ , рассчитанные при  $r_n = 0$  (а),  $r_n = 0,5$  (б),  $r_n = 1$  (в) и  $r_n = 1,5$  (г)

Ангармонические искажения сигнальных характеристик, проявляющиеся в изменениях «наклона волн», зависят от величины параметра  $C_{oc}$ , характера (возрастания или убывания) модулирующей функции и внутренних параметров генератора. Скорость изменения фазового набега  $IFD(t_n)$  при этом имеет осциллирующий характер с формированием пиков мгновенной частоты (см. рис. 2, а, 3, а). Высота пиков возрастает с увеличением параметра  $C_{oc}$ , который в свою очередь также зависит от внутренних параметров генератора и уровня отраженного излучения. Установлено в процессе вычислений, что среднее значение мгновенной частоты  $IFD(t_n)$  за период модуляции, при условии выполнения неравенства  $C_{oc} < 1$ , равно частоте сигнала го-модинной СБРЛ с ЧМ.

В рассматриваемом здесь случае (произвольного соотношения  $\tau$  и  $T_a$ ) с увеличением  $r_n$ , как видно из кривых рис. 2, б–г, и рис. 3, б–г, вид диаграммы ФАХ  $\delta(t_n)$  приближается к линейной функции. При этом высота пиков мгновенной разности частот  $IFD(t_n)$  и степень анггармонических искажений диаграмм АХА существенно снижаются. Особенно заметна такая тенденция в первой рабочей зоне, где  $0 \leq r_n \leq 1$ . Расчеты характеристик при иных значениях  $r_n$  показали, что в случае значений  $r_n$ , кратных целому числу ( $r_n = 1, 2, \dots$ ), АХА имеют практически синусоидальный вид.

Из представленных на рис. 4, в, г, спектрограмм видно, что в рассматриваемом здесь случае с увеличением  $r_n$  уровень высших гармонических составляющих резко падает. Параметром, характеризующим степень искажения квазипериодических колебаний, является коэффициент гармоник  $K_r$ . Результаты расчета этих коэффициентов представлены на рис. 5 в виде характеристик  $K_r(r_n)$  для различных значений параметра  $C_{oc}$ . В этих расчетах учитывались амплитуды первых десяти гармоник ряда Фурье.



Рис. 5. Графики  $K_r(r_n)$ , рассчитанные при  $C_{oc} = 0,4$  (кривая 1) и  $C_{oc} = 0,8$  (кривая 2)



Рис. 6. Графики  $a_0(r_n)$  (кривая 1) и  $\chi_0(r_n)$  (кривая 2), рассчитанные при  $C_{oc} = 0,8$

Из полученных графиков (рис. 5) видно, что наибольшие искажения сигналов АСБРЛ с ЧМ наблюдаются в области малых значений первой рабочей зоны. При величине параметра  $C_{oc} = 0,8$  коэффициент гармоник в этой зоне достигает значения порядка 40 %. С последующим переходом в рабочие зоны более высокого порядка, как отмечалось выше, искажения сигналов значительно уменьшаются, достигая минимальных значений при  $r_n = 1, 2, \dots$

Возвращаясь к рассмотрению результатов расчета, представленных на рис. 4, необходимо отметить наличие на ряде спектрограмм постоянных составляющих  $a_0(F_n)$ . Данные составляющие также заслуживают особого внимания при изучении сигналов АСБРЛ с ЧМ. Их учет может потребоваться, например, при обработке сигналов, анализе помехоустойчивости систем и пр.

Результаты расчета относительных уровней постоянных составляющих  $a_0(r_n)$  и  $\chi_0(r_n)$  в зависимости от величины нормированного расстояния  $r_n$  при величине параметра  $C_{oc} = 0,8$  для автодинных откликов  $a_n(t_n)$  и  $\chi_n(t_n)$  представлены на рис. 6. Из этих кривых видно, что в первой рабочей зоне АСБРЛ с ЧМ при больших значениях параметра  $C_{oc}$ , когда он соизмерим с единицей, уровень постоянной составляющей может иметь величины, соизмеримые с амплитудными значениями сигналов. В зонах более высокого порядка влиянием

постоянных составляющих можно пренебречь. Необходимо отметить также, что при выполнении условия  $C_{oc} \ll 1$  постоянные составляющие в выходных сигналах АСБРЛ с ЧМ практически отсутствуют.

### Численный анализ сигналов при ЧМ по пилообразному симметричному закону

Теперь рассмотрим случай использования в АСБРЛ ЧМ по симметричному пилообразному закону. Данный закон за каждый период модулирующей функции имеет два участка постоянной производной, но с разными знаками. Математическая запись этого закона имеет вид [22]:

$$f_m(t_n) = (2/\pi) \arcsin[\sin(2\pi t_n)] . \quad (16)$$

Для случаев приближающегося (см. рис. 7) и удаляющегося (см. рис. 8) объекта представлены временные диаграммы ФХА  $\delta(t_n)$ , МРЧ  $IFD(t_n)$  и АХА  $a_n(t_n)$ , рассчитанные согласно (10), (12) с учетом (13) и (16) при  $B_d = \pm 1$  для различных нормированных расстояний  $r_n$  до отражающего объекта:  $r_n = 0$  (а);  $r_n = 0,5$  (б);  $r_n = 1$  (в);  $r_n = 1,5$  (г).

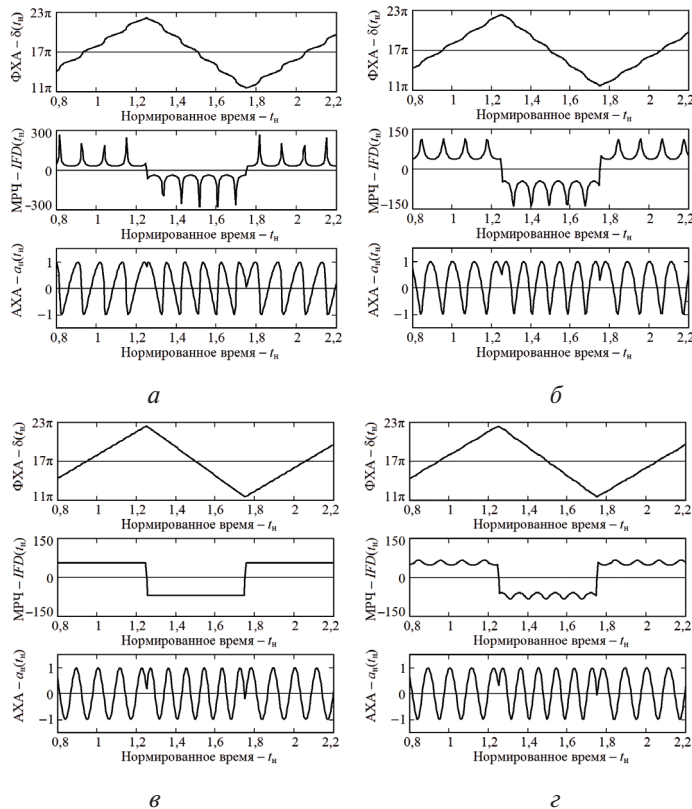


Рис. 7. Временные диаграммы ФХА  $\delta(t_n)$ , МРЧ  $IFD(t_n)$  и АХА  $a_n(t_n)$  для приближающегося объекта при:  $r_n = 0$  (а),  $r_n = 0,5$  (б),  $r_n = 1$  (в) и  $r_n = 1,5$  (г)

Для этих же случаев и нормированных расстояний  $r_n$  были рассчитаны также спектрограммы сигналов за период модуляции, представленные на рис. 9.

Из сравнения временных и спектральных диаграмм (рис. 7, 8 и 9) следует, что при смене знака радиальной скорости среднее значение частоты сигнала за период модуляции не меняется. В случае приближающегося объекта частота автодинного отклика на возрастающем участке модуляционной характеристики уменьшается на величину доплеровского смещения, а на спадающем — растет на эту же величину. Смена направления движения вызывает изменение описанного порядка на обратный.

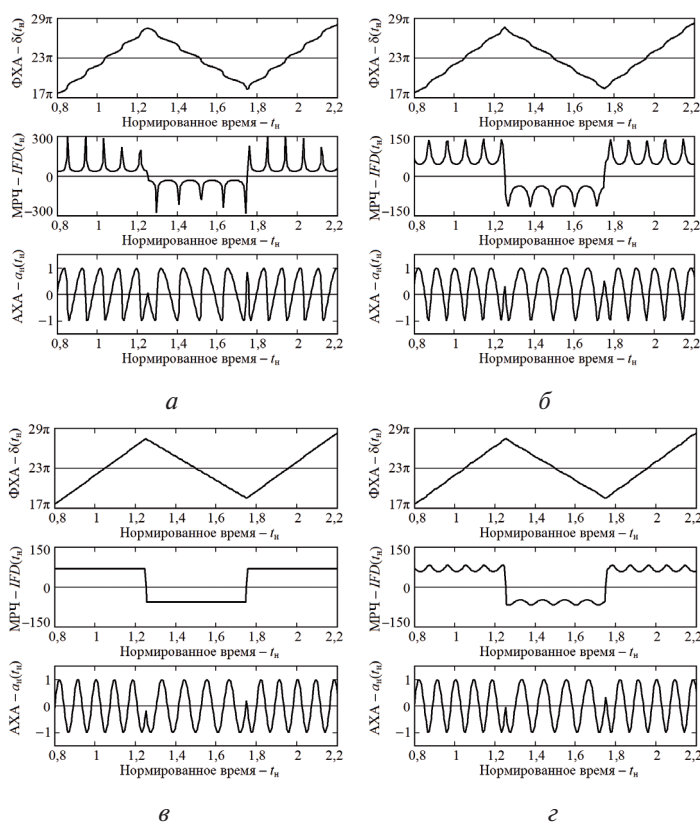


Рис. 8. Временные диаграммы ФХА  $\delta(t_n)$ , МРЧ  $IFD(t_n)$  и АХА  $a_d(t_n)$  для удаляющегося объекта при:  $r_n = 0$  (а),  $r_n = 0,5$  (б),  $r_n = 1$  (в) и  $r_n = 1,5$  (г)

При этом необходимо отметить, что увеличение частоты сигнала в один полупериод, уменьшение частоты в другой полупериод в случае движущегося отражателя и изменение этого порядка при смене направления движения (см. рис. 7, 8) находятся в полном соответ-

вии с теорией радиолокационных систем гомодинного типа [1]. Данное явление широко используется при обработке сигналов в СБРЛ для выделения информации о дальности до объекта, его скорости и направлении движения.

Отличия сигналов АСБРЛ с ЧМ состоят в наличии их ангармонических искажений при условии, когда параметр  $C_{oc}$  соизмерим с единицей, и появлении дополнительного фазового смещения, обусловленного динамикой автодинных изменений частоты генерации. При этом обращает на себя внимание (см. рис. 9, *a–г*) «расползание» спектра сигнала по типу спектра частотно манипулированного колебания [38] и его независимость от направления движения объекта локации. Здесь также присутствуют высшие гармоники и компоненты их комбинационного взаимодействия, а также низкочастотные компоненты на частоте модуляции, соответствующие частотному сдвигу от движущегося отражающего объекта, и постоянная составляющая

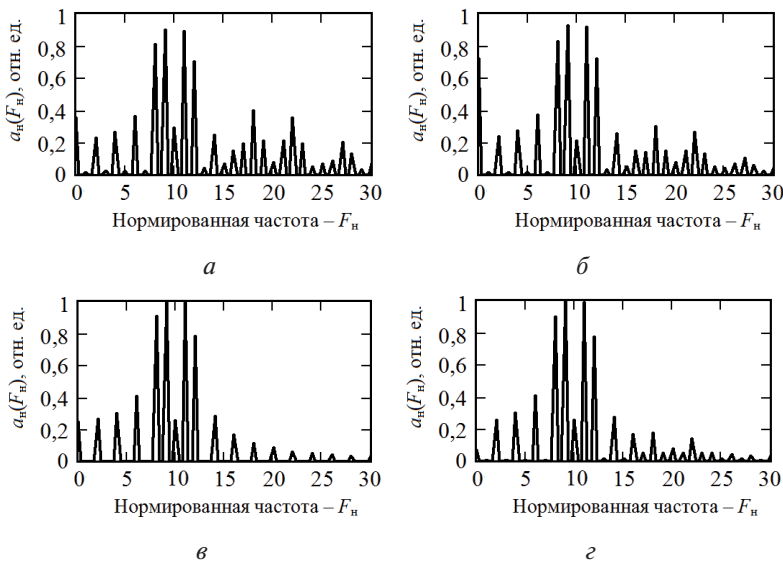


Рис. 9. Спектрограммы  $a_n(F_n)$ , рассчитанные для движущегося объекта при различных значениях  $r_n$ :  $r_n = 0$  (*a*),  $r_n = 0,5$  (*б*),  $r_n = 1$  (*в*) и  $r_n = 1,5$  (*г*)

Из представленных на рис. 9, *б–г*, спектрограмм видно, что в рассматриваемом здесь случае с увеличением  $r_n$  уровень высших гармонических составляющих значительно уменьшается. Результаты расчета коэффициента нелинейных искажений в зависимости от величины  $r_n$  представлены на рис. 10 в виде характеристик  $K_r(r_n)$  при различных значениях параметра  $C_{oc}$ . Из этих графиков видно, что наибольшие искажения сигналов АСБРЛ с ЧМ по симметричному закону



наблюдаются в средней части первой рабочей зоны. При величине параметра  $C_{oc} = 0,8$  коэффициент гармоник здесь достигает значения порядка 40 %. С последующим переходом в рабочие зоны более высокого порядка, как отмечалось выше, искажения сигналов значительно уменьшаются.

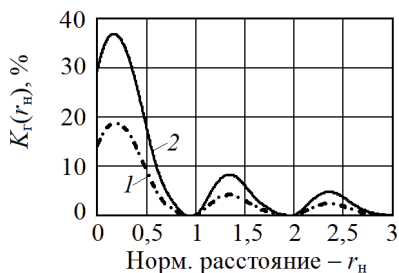


Рис. 10. Графики  $K_r(r_n)$ , рассчитанные при  $C_{oc} = 0,4$  (кривая 1) и  $C_{oc} = 0,8$  (кривая 2)



Рис. 11. Графики  $a_0(r_n)$  (кривая 1) и  $\chi_0(r_n)$  (кривая 2), рассчитанные при  $C_{oc} = 0,8$

Возвращаясь к спектрограммам (рис. 9), необходимо отметить также наличие в сигнальных характеристиках постоянных составляющих  $a_0(F_n)$ . Результаты расчета относительных уровней постоянных составляющих  $a_0(r_n)$ , а также  $\chi_0(r_n)$  в зависимости от величины  $r_n$  при величине параметра  $C_{oc} = 0,8$  представлены на рис. 11. Из сравнения полученных кривых рис. 6, 11 видно, что они практически совпадают.

Таким образом, рассмотрены особенности формирования сигналов АСБРЛ с ЧМ по симметричному пилообразному закону в общем случае произвольного соотношения времени запаздывания  $\tau$  отраженного излучения и периода  $T_a$  автодинных сигналов.

### Общее свойство сигнальных характеристик АСБРЛ с ЧМ

Для объяснения характера полученных зависимостей от нормированного расстояния  $r_n$  введем понятие «эквивалентный параметр»  $C_{эkv}$  обратной связи автодинной системы «АСБРЛ с ЧМ — отражающий

объект»:  $C_{эkv} = C_{oc} K_d$ . Здесь  $K_d = \sum_{n=0}^N (-1)^n X_n(r_n)$  — входящий в (8)

и (12) «динамический» множитель обратной связи. Набег фазы  $\delta(r_n)$  отраженной волны с изменением  $r_n$  также изменяется. Для этих изменений введем понятие «угол динамического смещения фазы»  $\Delta\delta_d$  автодинного отклика:  $\Delta\delta_d \equiv \Delta\delta_d(r_n) = \delta(r_n) - \delta(r_n = 0)$ , где  $\delta_d(r_n)$  и  $\delta(r_n = 0)$  — фазы мгновенного коэффициента отражения, полученные при текущем значении  $r_n$  и при его нулевом значении соответственно. Результаты расчета зависимостей  $K_d(r_n)$  и  $\Delta\delta_d(r_n)$  представ-

лены на рис. 12, причем для зависимости  $\Delta\delta_d(r_n)$  получены две кривые: для неизохронного (кривая 1) и изохронного (кривая 2) генератора.

Из кривой зависимости  $K_d(r_n)$  (см. рис. 12, а) видно, что с увеличением  $r_n$  в первой рабочей зоне, где  $0 < r_n < 1$ , величина  $K_d$  и, соответственно, эквивалентного параметра  $C_{\text{экв}}$  уменьшается почти на порядок. Далее, с увеличением  $r_n$ , величина параметра  $C_{\text{экв}}$  асимптотически затухает с небольшими подъемами в средней части рабочих зон более высокого порядка, где  $r_n > 1$ .

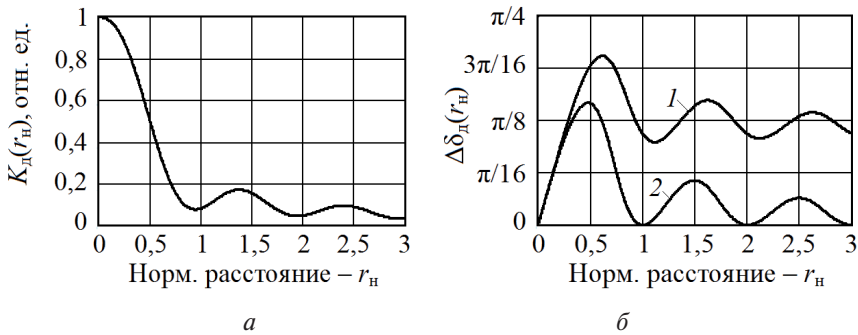


Рис. 12. Графики  $K_d(r_n)$  (а) и  $\Delta\delta_d(r_n)$  (б), полученные при  $\theta = 1$  (кривая 1),  $\theta = 0$  (кривая 2)

Динамические изменения фазы  $\Delta\delta_d$  сигнальных характеристик, влияющие на характер их искажения, что хорошо видно из сравнения кривых рис. 2, а, б, рис. 3, а, б, рис. 7, а, б, и рис. 8, а, б, с увеличением  $r_n$  в первой рабочей зоне также наибольшие. При значении  $r_n = 1$  имеется первый минимум этой величины, который определяется значением параметра  $\theta$ , характеризующего неизохронность генератора (см. рис. 12, б). С последующим увеличением  $r_n$  здесь также наблюдается асимптотическое затухание «колебаний» динамических изменений фазы  $\Delta\delta_d$ .

Полученные здесь результаты, кажущиеся противоречащими устоявшимся представлениям [22], имеют вполне объяснимый физический смысл. Для его понимания достаточно обратиться к упрощенной модели процесса взаимодействия автодинного генератора с собственным отраженным излучением, рассмотренной в работах [39, 40] методом шагов, на примере радиоимпульсного автодина. Из этой модели следует, что с укорочением относительной длительности радиоимпульса (это эквивалентно увеличению нормированного расстояния) число парциальных отражений за время действия радиоимпульса уменьшается. Это ведет к уменьшению эквивалентного параметра обратной связи  $C_{\text{экв}}$  автодинной системы и, соответственно, уровня искажений сигнала. При достижении величины нормированного расстояния единицы ( $r_n = 1$ ), когда воздействие отраженного излучения становит-

ся однопарциальным, обеспечивается формирование практически гармонических автодинных изменений амплитуды и частоты колебаний генератора.

### Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования особенностей сигналов АСБРЛ с ЧМ проводились с генераторным модулем на диоде Ганна 8-мм диапазона в составе автодинного датчика, разработанного для контроля занятости стрелочных переводов на сортировочных горках [5–7].

На рис. 13 представлен общий вид датчика и его основных компонентов. Антенна с СВЧ-модулем и печатная плата формирования зондирующего сигнала, цифровой обработки сигналов и интерфейса связи RS-485 помещены в цилиндрический герметизированный корпус из дюралюминия диаметром 92 мм и длиной 170 мм. Диэлектрическая линза антенны является одновременно передней стенкой корпуса.

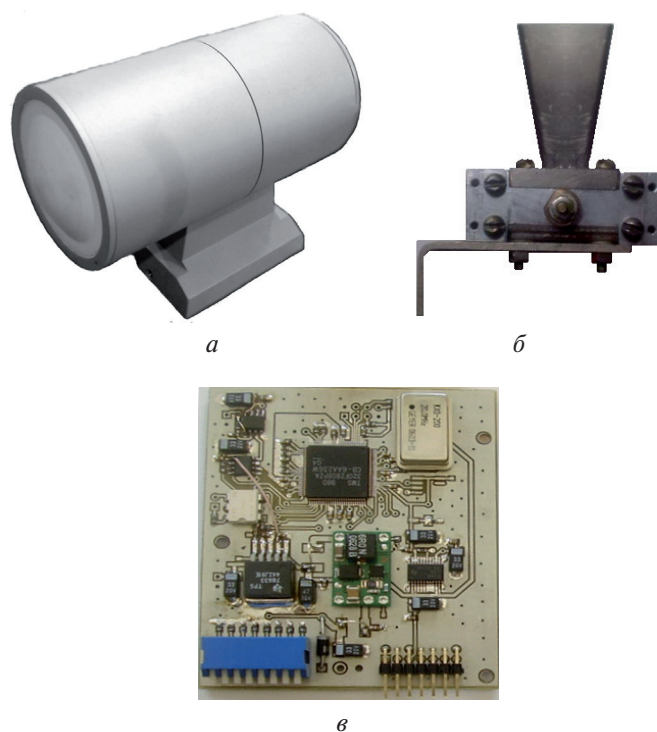


Рис. 13. Общий вид автодинного датчика (а) автодинного модуля с рупорной антенной (б) и печатной платы (в) блока управления и обработки сигналов

Автодинный СВЧ-модуль датчика выполнен на основе диода Ганна AA727 А и варикапа 3 А637 А-6 в корпусном исполнении. Выходная мощность излучения составляет 25 мВт, центральная частота 36,5 ГГц. СВЧ модуль обеспечивает в режиме линейной ЧМ перестройку частоты в полосе 500 МГц. Закон ЧМ — симметричный или несимметричный пилообразный, частота модуляции 10 кГц.

Автодинный сигнал выделяется в цепи питания диода Ганна с помощью широкополосного трансформатора тока. После фильтрации и усиления он поступает на аналого-цифровой преобразователь цифрового сигнального процессора (ЦСП) TMS320F2808, фирмы Texas Instrument, блока обработки. В этом блоке программно реализованы функции формирования напряжения модуляции частоты генерации, цифровой обработки сигнала и интерфейса связи RS-485 с персональным компьютером.

Вычислительным ядром ЦСП производится цифровая обработка сигнала (фильтрация и Фурье-анализ), результаты которой передаются через универсальный асинхронный приемопередатчик на персональный компьютер, используемый в качестве системы отображения радиолокационной информации. Когда в диаграмме направленности антенны АСБРЛ находится отражающий объект, на выходе одного из фильтров анализатора спектра ЦСП присутствует сигнал. Амплитуда его характеризует отражающую способность наблюдаемого объекта, а номер фильтра, в котором присутствует сигнал, характеризует дистанцию от АСБРЛ до объекта.

Для исключения из спектра принятого сигнала компонентов, связанных с ПАМ, и отражений от ближних объектов, информация от которых не представляет интереса, перед преобразованием Фурье в ЦСП применяется предварительная фильтрация сигнала. Для этого к исходному сигналу применяется алгоритм «скользящее среднее», который выступает в качестве фильтра нижних частот [41]. После выделения низкочастотных составляющих этим фильтром они вычитаются из исходного сигнала, в результате чего вблизи АСБРЛ до расстояния порядка одного метра формируется «мертвая зона». Оставшиеся на выходе фильтра высокочастотные составляющие сигнала содержат информацию об отражающих объектах, находящихся в требуемом диапазоне дальностей.

На рис. 14 представлены спектрограммы сигналов, полученных от приближающегося (*а*), неподвижного (*б*) и удаляющегося (*в*) отражающего объекта при использовании в АСБРЛ несимметричного пилообразного закона ЧМ. Для перечисленных случаев на рис. 15 представлены спектрограммы при использовании симметричного закона ЧМ. В качестве отражающего объекта использовался электромеханический имитатор доплеровского сигнала [33].

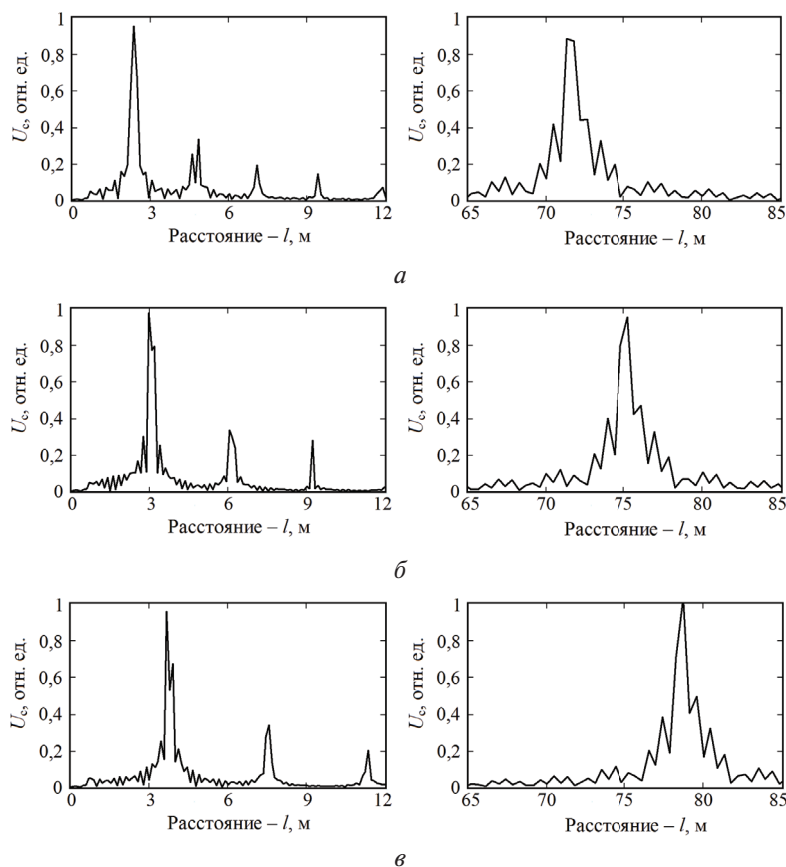


Рис. 14. Спектрограммы преобразованных автодином сигналов, полученные от приближающегося (а), неподвижного (б) и удаляющегося (в) отражающего объекта (имитатора) при несимметричном пилообразном законе ЧМ

В первой группе опытов расстояние от АСБРЛ до имитатора было 3 м (см. на рис. 14 и 15 левые спектрограммы), а во второй — 75 м (см. на рис. 14 и 15 правые спектрограммы). В первых опытах к СВЧ-модулю и имитатору пристыковывались рупорные антенны с шириной диаграммы направленности по уровню минус 3 дБ  $10 \times 10$  градусов и коэффициентами усиления около 25 дБ. Во вторых опытах использовались двухзеркальные антенны с эллиптическим малым зеркалом (антенна типа АДЭ) с шириной диаграммы направленности  $1,4 \times 1,4$  градусов и коэффициентами усиления около 42 дБ. Амплитуды сигналов ( $U_s$ ) в обоих опытах выравнивались с помощью переменного аттенюатора, вводимого между СВЧ-модулем и антенной. При этом затухание аттенюаторов устанавливалось таким, чтобы обеспечивалась величина параметра  $C_{oc} \approx 0,8$ .

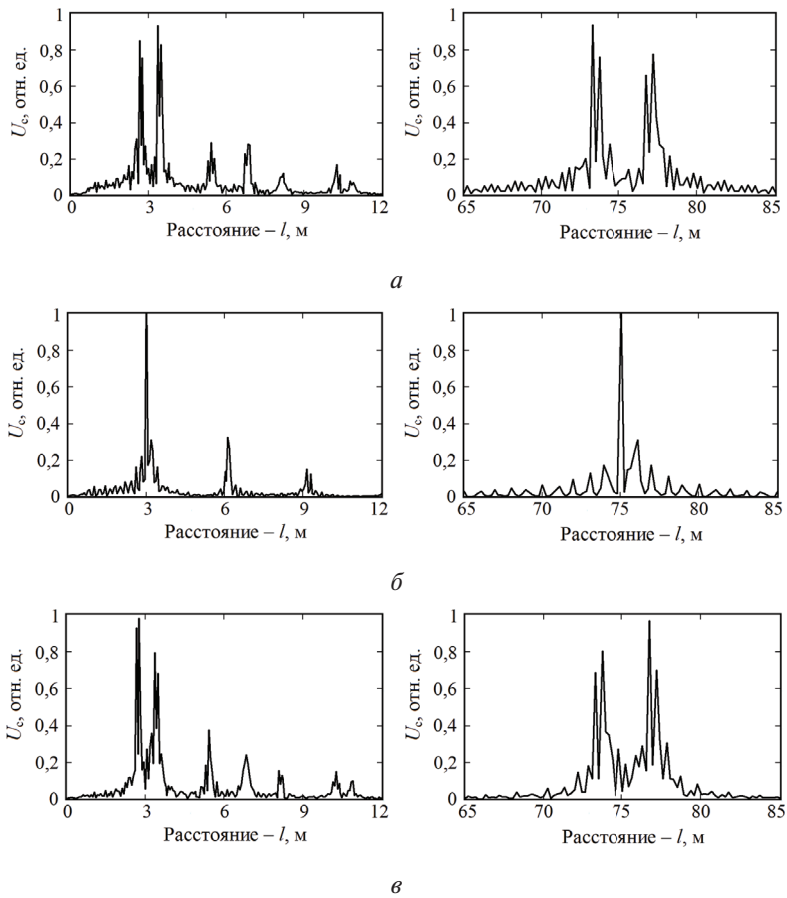


Рис. 15. Спектрограммы преобразованных автодином сигналов, полученные от приближающегося (а), неподвижного (б) и удаляющегося (в) отражающего объекта (имитатора) при симметричном пилообразном законе ЧМ

Направление движения отражающего объекта изменялось переключением направления вращения электродвигателя, вал которого связан с отражателем в имитаторе доплеровского сигнала [33]. В случае неподвижного объекта питание от двигателя отключалось и отражатель останавливался.

Первый опыт по соотношению времени запаздывания  $\tau$  отраженного излучения и периода  $T_a$  сигнала в обоих случаях применяемых законов модуляции соответствует началу первой рабочей зоны  $r_n \ll 1$ . Во втором опыте для несимметричного закона ЧМ нормированное расстояние  $r_n = 1,25$ , а для симметричного закона —  $r_n = 2,5$ .

При использовании пилообразного несимметричного закона ЧМ перемещающийся отражатель вызывает смещение спектра преобразо-

ванного сигнала в сторону уменьшения частоты в случае его приближения, а в сторону увеличения — при удалении от АСБРЛ (см. рис. 14). При использовании симметричного пилообразного закона движущийся отражатель вызывает «расщепление» спектра на две «боковые» составляющие, отстоящие от среднего значения частоты на величину доплеровского смещения (см. рис. 15). Данные положения согласуются с общей теорией работы СБРЛ с ЧМ [1].

В первом опыте (см. левые диаграммы рис. 14 и 15) на спектрограммах виден заметный уровень второй и третьей высших гармоник, характерный ангармоническим искажениям автодинного сигнала. Во втором опыте (см. правые диаграммы) уровень высших гармоник значительно ниже, чем в предыдущем опыте. Данные результаты являются новыми, они подтверждают сделанные выше выводы теоретического анализа.

Таким образом, полученные экспериментальные данные подтвердили адекватность разработанной выше математической модели для анализа и расчета сигнальных и спектральных характеристик АСБРЛ с ЧМ.

### Заключение

В работе получены общие соотношения для анализа особенностей формирования сигналов в АСБРЛ для случая как неподвижного, так и движущегося отражающего объекта при использовании произвольных видов ЧМ-излучения. Разработанная математическая модель предусматривает анализ взаимодействия АСБРЛ с отраженным от объекта локации излучением при произвольном соотношении времени запаздывания  $\tau$  отраженного излучения и периода  $T_a$  автодинного сигнала.

Выполненные расчеты и экспериментальные исследования сигналов АСБРЛ для линейных видов модуляции частоты показали, что частота автодинного сигнала как для движущегося, так и неподвижного отражателя точно соответствует частоте преобразованного сигнала, получаемого в случае гомодинной системы [1]. Однако наличие искажений автодинных сигналов и обогащение спектра требуют своего учета в устройствах обработки в условиях, когда расстояние до отражающего объекта мало ( $r_n \ll 1$ ), а величина параметра  $C_{oc}$  соизмерима с единицей.

Полученные результаты исследований характеристик автодинов для случая, когда период автодинного отклика соизмерим или даже меньше времени запаздывания отраженного излучения, показали, что уровень искажения автодинных сигналов при гипотетическом сохранении амплитуды отраженной волны уменьшается с увеличением дальности до отражающего объекта. Расчеты показали, что при величине параметра обратной связи, превышающей его граничное значе-



ние даже в несколько раз, в высших рабочих зонах автодинных АСБРЛ с ЧМ может обеспечиваться устойчивая работа генератора с формированием квазигармонических сигналов.

Полученные в настоящей работе результаты анализа развивают и дополняют результаты известных исследований, которые опубликованы в ряде предшествующих работ. Например, в части учета ЧМ генератора — результаты работ [36, 37]; в части учета в модели автодина динамики изменения фазы отраженного излучения при его распространении до объекта и обратно — результаты работ [19–23, 27–29]; а в части развития модели на случай движущегося объекта локации — работ [30, 31].

Выявленные закономерности формирования сигналов в АСБРЛ с ЧМ имеют достаточно общий характер и физическую трактовку на основе известного из теории систем с запаздыванием метода шагов [39, 40]. В связи с этим полученные в настоящей работе результаты, как нам представляется, могут использоваться также при расчете сигналов автодинных систем, выполненных на основе полупроводниковых лазерных модулей с ЧМ [24–26].

### Благодарность

Авторы выражают признательность Г. П. Ермаку и А. С. Васильеву за активное участие в выполнении экспериментальных исследований АСБРЛ с ЧМ согласно договору о научно-техническом сотрудничестве между Институтом радиоэлектроники и информационных технологий — РТФ УрФУ и Институтом радиофизики и электроники НАН Украины.

### Список литературы

1. Komarov I. V., Smolskiy S. M. Fundamentals of short-range FM radar. Norwood : Artech House, 2003. 289 p. doi: 10.1109/MAES.2004.1346903.
2. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne System with a Single Antenna // 11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010). Vilnius, Lithuania, 2010. 2. Pp. 406–409.
3. Use of Microstrip Impedance-Measurement Technique in the Design of a BARITT Diplex Doppler Sensor / B. M. Armstrong, R. Brown, F. Rix [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. MTT. 1980. 28 (12). Pp. 1437–1442. doi: 10.1109/TMTT.1980.1130263.
4. Development of a Low-Cost 35 GHz Radar Sensor / A. A. Efanov, C. G. Diskus, A. Stelzer [et al.] // Annals of Telecommunications. 1997. 52 (3). Pp. 219–223. doi: 10.1007/BF02996047.
5. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor / A. V. Varavin [et al.] // Telecom. Radio Engineering. 2010. 69 (5). Pp. 451–458. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.

6. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications / G. P. Ermak, I. V. Popov, A. S. Vasilev [et al.] // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2012. 71 (6). Pp. 567–580. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80.

7. Современные гибридноинтегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Ч. 9. Радиолокационное применение автодинов / В. Я. Носков, А. В. Варавин, А. С. Васильев [и др.] // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2016. № 3. С. 32–86.

8. Votoropin S. D., Danilin A. I. Using of GIS EHF autodyne transceiver modules on mesa-planar Gunn diodes for definition of turbo machine blades deformations // *Microwave Electronics: Measurements, Identification, Application Conference (MEMIA)*. 2001. Pp. 243–245. doi: 10.1109/MEMIA.2001.982365.

9. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave Autodyne Vibrosensor in Aeroengine Diagnostics // *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. 2014. Pp. 140–143. doi: 10.1109/EFTF.2014.7331447.

10. Proximity Vital Sign Sensor Using Self-Oscillating Mixer / S. Kim [et al.] // *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. 2016. Pp. 1446–1448. doi: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402.

11. Usanov D. A., Skripal A. V., Postelga A. E. A Microwave Autodyne Meter of Vibration Parameters // *Instruments and Experimental Techniques*. 2004. 47 (5). Pp. 689–693. doi: 10.1023/B: INET.0000043882.16801.3a.

12. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of Complicated Movement of Part of the Human Body Using Radio Wave Autodyne Signal // *Bio-medical Engineering*. 2011. 45 (1). Pp. 6–8. doi: 10.1007/s10527-011-9198-9.

13. Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Двухдиодный автодин в системах радиоволнового контроля динамических процессов // *Датчики и системы*. 2016. 6. С. 31–37.

14. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Application of Two-Diode Auto-dynes in Devices for Radiowave Control of Product Dimensions // *Measurement Techniques*. 2016. 59 (7). Pp. 715–721. doi: 10.1007/s11018-016-1035-9.

15. Nagasaku T., Kondoh H., Shunoda H. Radar Sensor: Patent US 6717544 B2; Pub. Date: April, 6, 2004. Filed: Aug. 26, 2002.

16. Votoropin S. D. Autodyne Sensors of the EHF Range on Gunn Diodes // *38th European Microwave Conference*. 2008. Pp. 1330–1333. doi: 10.1109/EUMC.2008.4751709.

17. Utagawa H., Matsui T. Microwave / Millimeter Wave Sensor: Patent Appl. Publ. US 2010/0117891 A1. Pub. Date: May 13, 2010. Filed: Mar. 31, 2008.

18. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor // *IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique*, MTT. 1985. 31 (8). Pp. 613–624. doi: 10.1109/TMTT.1983.1131559.

19. Votoropin S. D., Noskov V. Ya. Analysis of Operating Regimes of EHF Hybrid-Integrated Autodynes Based on the Gunn Micro Power Mesa Pla-

nar Diodes // Russian Physics Journal. 2002. 45 (2). Pp. 195–206. doi: 10.1023/A:1019664300993.

20. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of Oscillators with Linear Frequency Modulation // Russian Physics Journal. 2008. 51 (6). Pp. 610–618. doi: 10.1007/s11182-008-9083-5.

21. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of a Radio-Pulse Oscillator with Frequency Modulation // Russian Physics Journal. 2008. 51 (7). Pp. 750–759. doi: 10.1007/s11182-008-9105-3.

22. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 3. С. 3–50.

23. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation / V. Ya. Noskov, A. S. Vasiliev, G. P. Ermak [et al.] // Radioelectronics and Communications Systems. 2017. 60 (3). Pp. 123–131. doi: 10.20535/S0021347017030049.

24. Laser Diode Self-Mixing Technique for Sensing Applications (Review article) / G. Giuliani [et al.] // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2002. 4 (6). Pp. 283–294. doi: 10.1088/1464-4258/4/6/371.

25. Sobolev V. S., Kashcheeva G. A. Self-Mixing Frequency-Modulated Laser Interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2008. 44 (6). Pp. 519–529. doi: 10.3103/S8756699008060058.

26. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I. Determination of Nanovibration Amplitudes Using Frequency-Modulated Semiconductor Laser Autodyne // Quantum Electronics. 2014. 44 (2). Pp. 184–188. doi: 10.1070/QE2014v044n02ABEH015176.

27. Mathematical Model of FM Autodyne Radar / V. Ya. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupahin [et al.] // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16) (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016). A-25. Pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538000.

28. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar / V. Ya. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupahin [et al.] // 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16) (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016). A-9. Pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538019.

29. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar / V. Ya. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupahin [et al.] // 2016 9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16) (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016). A-10. Pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7537984.

30. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law / V. Ya. Noskov, K. A. Ignatkov, A. P. Chupa-

hin [et al.] // Telecommunication and Radio Engineering. 2016. 75 (17). Pp. 1551–1566. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.

31. Peculiarities of Signal Formation of Autodyne Radars with Linear Frequency Modulation [Electronic resource] / V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov, A. P. Chupahin [et al.] // Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radio-aparatobuduv. 2016. 67. Pp. 50–57. URL: <http://radap.kpi.ua/en/radiotechnique/article/view/1366> (дата обращения: 2.10.2017).

32. Kurokawa K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators // Proceedings of the IEEE. 1973. 61 (10). Pp. 1386–1410. doi: 10.1109/PROC.1973.9293.

33. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–42.

34. Noskov V. Ya., Ermak G. P. Signal and Fluctuation Characteristics of Autodyne Vibration and Displacement Meters // Telecommunication and Radio Engineering. 2014. 73 (19). Pp. 1727–1743. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30.

35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. About Applicability of Quasi-Static Method of Autodyne Systems Analysis // Radioelectronics and Communications Systems. 2014. 57, no. 3. Pp. 139–148. doi: 10.3103/S0735272714030054.

36. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Autodyne Signals in Case of Random Delay Time of the Reflected Radiation // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. 72, no. 16. Pp. 1521–1536. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.70.

37. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamic Features of Autodyne Signals // Russian Physics Journal. 2013. 56, no. 4. Pp. 420–428. doi: 10.1007/s11182–013–0051–3.

38. Латхи Б. П. Системы передачи информации. М.: Связь, 1971. 324 с.

39. Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридноинтегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 6. Исследования радиоимпульсных автодинов // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 6. С. 3–51.

40. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Dynamics of Autodyne Response Formation in Microwave Generators // Radioelectronics and Communications Systems. 2013. 56, no. 5. Pp. 227–242. doi: 10.3103/S0735272713050026.

41. Hussain Z. M., Sadik A. Z., O'Shea P. Digital Signal Processing: An Introduction with MATLAB and Applications. Springer, 2011. 350 p.

## References

1. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of short-range FM radar*. Norwood, Artech House, 2003. 289 p.

2. Alidoost S. A., Sadeghzade R., Fatemi R. Autodyne System with a Single Antenna. *11th Intern. Radar Symposium (IRS-2010)*. Vilnius, Lithuania, 2010, 2, pp. 406–409.

3. Armstrong B. M., Brown R., Rix F., Stewart J. A. C. Use of Micro-strip Impedance-Measurement Technique in the Design of a BARITT Diplex Doppler Sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1980, MTT-28 (12), pp. 1437–1442. doi: 10.1109/TMTT.1980.1130263.

4. Efanov A. A., Diskus C. G., Stelzer A., Thim H. W., Lubke K., Springer A. L. Development of a Low-Cost 35 GHz Radar Sensor. *Annals of Telecommunications*, 1997, 52 (3), pp. 219–223. doi: 10.1007/BF02996047.

5. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecom. Radio Engineering*, 2010, 69 (5), pp. 451–458. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.

6. Ermak G. P., Popov I. V., Vasilev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Radar sensors for hump yard and rail crossing applications. *Telecommunication and Radio Engineering*, 2012, 71 (6), pp. 567–580. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i6.80.

7. Noskov V. Ya., Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Zakarlyuk N. M., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Sovremennyye gibridno-integralnyye avtodinnyye generatoryi mikrovolnovogo i millimetrovogo diapazonov i ih primeneniye. Ch. 9. Radiolokatsionnoe primeneniye avtodinov [Modern Hybrid-Integrated Autodyne Oscillators of Microwave and Millimeter Wave Ranges and Their Application. Part 9. Autodyne Radar Applications]. *Uspеhi sovremennoy radioelektroniki* [Successes of modern electronic engineering], 2016, (3), pp. 32–86. (In Russian)

8. Votoropin S. D., Danilin A. I. Using of GIS EHF autodyne transceiver modules on mesa-planar Gunn diodes for definition of turbo machine blades deformations. *Microwave Electronics: Measurements, Identification, Application Conference (MEMIA)*, 2001, pp. 243–245. doi: 10.1109/MEMIA.2001.982365.

9. Mirsaitov F. N., Safonova E. V., Boloznev V. V. Microwave Autodyne Vibrosensor in Aeroengine Diagnostics. *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2014, pp. 140–143. doi: 10.1109/EFTF.2014.7331447.

10. Kim S.; Kim B.-H., Yook J.-G., Yun G.-H. Proximity Vital Sign Sensor Using Self-Oscillating Mixer. *URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*, 2016, pp. 1446–1448. doi: 10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601402.

11. Usanov D. A., Skripal A. V., Postelga A. E. A Microwave Autodyne Meter of Vibration Parameters. *Instruments and Experimental Techniques*, 2004, 47 (5), pp. 689–693. doi: 10.1023/B: INET.0000043882.16801.3a.

12. Usanov D. A., Postelga A. E. Reconstruction of Complicated Movement of Part of the Human Body Using Radio Wave Autodyne Signal. *Bio-medical Engineering*, 2011, 45 (1), pp. 6–8. doi: 10.1007/s10527-011-9198-9.

13. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Dvuhdiodnii avtodin v sistemah radiovolnovogo kontrolya dinamicheskikh processov [Application of a double-diode auto-dyne in radiowave monitoring systems of dynamic processes]. *Datchiki i sistemi* [Sensors and Systems], 2016, (6), pp. 31–37. (In Russian).

14. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Application of Two-Diode Auto-dynes in Devices for Radiowave Control of Product Dimensions. *Measurement Techniques*, 2016, 59 (7), pp. 715–721. doi: 10.1007/s11018-016-1035-9.

15. Nagasaku T., Kondoh H., Shunoda H. *Radar Sensor*. Patent US 6717544 B2. Pub. Date: April, 6, 2004. Filed: Aug. 26, 2002.

16. Votoropin S. D. Autodyne Sensors of the EHF Range on Gunn Diodes. *38th European Microwave Conference*, 2008, pp. 1330–1333. doi: 10.1109/EUMC.2008.4751709.

17. Utagawa H., Matsui T. *Microwave / Millimeter Wave Sensor*. Patent Appl. Publ. US 2010/0117891 A1. Pub. Date: May 13, 2010. Filed: Mar. 31, 2008.

18. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transaction of Microwave Theory and Technique*, 1985, MTT-31 (8), pp. 613–624. doi: 10.1109/TMTT.1983.1131559.

19. Votoropin S. D., Noskov V.Ya. Analysis of Operating Regimes of EHF Hybrid-Integrated Autodynes Based on the Gunn Micro Power Mesa Planar Diodes. *Russian Physics Journal*, 2002, 45 (2), pp. 195–206. doi: 10.1023/A:1019664300993.

20. Votoropin S. D., Noskov V.Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of Oscillators with Linear Frequency Modulation. *Russian Physics Journal*, 2008, 51 (6), pp. 610–618. doi: 10.1007/s11182-008-9083-5.

21. Votoropin S. D., Noskov V.Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of a Radio-Pulse Oscillator with Frequency Modulation. *Russian Physics Journal*, 2008, 51 (7), pp. 750–759. doi: 10.1007/s11182-008-9105-3.

22. Votoropin S. D., Noskov V.Ya., Smolskiy S. M. Sovremennie gibridno-integralnie avtodinnie generatori mikrovolnovogo i millimetrovogo diapazonov i ih primenenie. Ch. 5. Issledovaniya avtodinov s chastotnoi modulyaciei [Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 5. Investigations of frequency-modulated autodynes]. *Uspehi sovremennoi radioelektroniki* [Successes of modern electronic engineering], 2009, (3), pp. 3–50. (In Russian)

23. Noskov V.Ya., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2017, 60 (3), pp. 123–131. doi: 10.20535/S0021347017030049.

24. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser Diode Self-Mixing Technique for Sensing Applications (Review article). *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4 (6), pp. 283–294. doi: 10.1088/1464-4258/4/6/371.

25. Sobolev V. S., Kashcheeva G. A. Self-Mixing Frequency-Modulated Laser Inter-ferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2008, 44 (6), pp. 519–529. DOI: 10.3103/S8756699008060058.

26. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I. Determination of Nanovibration Amplitudes Using Frequency-Modulated Semiconductor Laser Auto-



dyne. *Quantum Electronics*, 2014, 44 (2), pp. 184–188. doi: 10.1070/QE2014v-044n02ABEH015176.

27. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Mathematical Model of FM Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16)* (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016), A-25, pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538000.

28. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)* (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016), A-9, pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7538019.

29. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)* (Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016), A-10, pp. 1–4. doi: 10.1109/MSMW.2016.7537984.

30. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*, 2016, 75 (17), pp. 1551–1566. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.

31. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of Signal Formation of Autodyne Radars with Linear Frequency Modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparotobuduv.*, 2016, no. 67, pp. 50–57. Available at: <http://radap.kpi.ua/en/radiotechnique/article/view/1366>. (accessed 01.10.2017).

32. Kurokawa K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators. *Proceedings of the IEEE*, 1973, 61 (10), pp. 1386–1410. doi: 10.1109/PROC.1973.9293.

33. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Zavisimost avtodinnykh harakteristik ot vnutrennykh parametrov SVCh generatorov [Autodyne Characteristic Dependence on the UHF Oscillator's Inherent Parameters]. *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2012, (6), pp. 24–42. (In Russian)

34. Noskov V.Ya., Ermak G. P. Signal and Fluctuation Characteristics of Autodyne Vibration and Displacement Meters. *Telecommunication and Radio Engineering*, 2014, 73 (19), pp. 1727–1743. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i19.30.

35. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A. About Applicability of Quasi-Static Method of Autodyne Systems Analysis. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2014, 57, no. 3, pp. 139–148. doi: 10.3103/S0735272714030054.

36. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A. Autodyne Signals in Case of Random Delay Time of the Reflected Radiation. *Telecommunication and Radio Engineering*, 2013, 72, no. 16, pp. 1521–1536. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i16.70.



37. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A. Dynamic Features of Autodyne Signals. *Russian Physics Journal*, 2013, 56, no. 4, pp. 420–428. DOI: 10.1007/s11182-013-0051-3.

38. Lathi B. P. *Communication systems*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1968, 320 p.

39. Noskov V.Ya., Smolskiy S. M. Sovremennie gibridno-integralnie avtodinnie generatori mikrovolnovogo i millimetrovogo diapazonov i ih primeneniye. Ch. 6. Issledovaniya radioimpulsnih avtodinov [Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter range and their applications. Part 6. Research of radio-pulse auto-dynes]. *Uspehi sovremennoi radioelektroniki* [Successes of modern electronic engineering], 2009, (6), pp. 3–51. (In Russian)

40. Noskov V.Ya., Ignatkov K. A. Dynamics of Autodyne Response Formation in Microwave Generators. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2013, 56, no. 5, pp. 227–242. doi: 10.3103/S0735272713050026.

41. Hussain Z. M., Sadik A. Z., O'Shea P. *Digital Signal Processing: An Introduction with MATLAB and Applications*. Springer, 2011, 350 p.

### Информация об авторах

**Владислав Яковлевич Носков** родился в 1948 г. Окончил радиотехнический факультет Томского института автоматизированных систем управления и радиоэлектроники в 1973 г. Защитил ученую степень кандидата наук в 1985 г., а степень доктора — в 1995. В настоящее время — профессор Департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ — РТФ. Автор более 300 научных работ и 17 изобретений.

**Кирилл Александрович Игнатков** родился в 1988 г. Окончил радиотехнический факультет УрФУ в 2010 г. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в 2014 г. Доцент Департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ — РТФ. Автор более 100 научных работ и 5 изобретений.

**Андрей Павлович Чупахин** родился в 1992 г. Окончил радиотехнический факультет УрФУ в 2014 г. Аспирант второго года обучения Департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ — РТФ. Автор более 20 научных работ и 2 изобретений.

### Information about the authors

**Vladislav Ya. Noskov** was born in 1948. Graduated from Radio Engineering Faculty of Tomsk Institute of Automated Control Systems and Radio Electronics in 1973. The PhD degree he has got in 1985, and the Dr.Sci. degree in 1995. At present, he is a professor of Technologies and Communication Means Dept. of Ural Federal University. The author of more than 300 scientific publications and 17 patents.

**Kirill A. Ignatkov** was born in 1988. Graduated from Radio Engineering Faculty of Ural Federal University in 2010. PhD thesis was defended in 2014. He works as the leading engineer of Technologies and Communication Means Dept. of Ural Federal University. The author of more than 100 scientific publications and 5 patents.

**Andrey P. Chupahin** was born in 1992. Graduated from Radio Engineering Faculty of Ural Federal University in 2014. PhD-student of the 2<sup>nd</sup> year of education at Technologies and Communication Means Dept. of Ural Federal University. The author of more than 20 scientific publications and 2 patents.